

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Eliminace vzniku vad při výrobě dílce

Piezo A998

Elimination of Defects in Production of

Piezo A998

Student: Nikola Jurečková

Osobní číslo: JUR0368

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ondřej Hilšer

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Nikola Jurečková**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Eliminace vzniku vad při výrobě dílce Piezo A998**
Elimination of Defects in Production of Piezo A998
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši v oblasti problematiky lisování práškových materiálů s bližším zaměřením na keramický materiál.
- 2) Proveďte rozbor technologického postupu výroby dílce Piezo A998.
- 3) Navrhněte případná konstrukční nebo technologická opatření pro omezení vzniku vad.
- 4) Proveďte celkové hodnocení rozboru technologického postupu a vliv navržených úprav na vznik neshodných výrobků.

Seznam doporučené odborné literatury:

MAYO, M. J. Processing of nanocrystalline ceramics from ultrafine particles. *International Materials Reviews*, 1996, Vol. 41, No. 3, pp. 85-115. ISSN 0950-6608.

PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu II*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.

BAREŠ, K. a kol. *Lisování*. Praha: SNTL-Státní nakladatelství technické literatury, 1971. 542 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ondřej Hilšer**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. 5. 2020

.....
Podpis autora práce

Prohlašuji že:

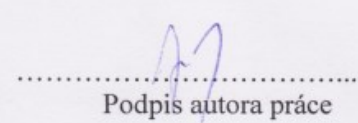
- jsem si vědoma, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/200 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále je Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude – li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB – TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne

18. 5. 2020

Jméno a příjmení autora práce: Nikola Jurečková

Adresa trvalého pobytu autora práce: Hrabšíň 292, Hrabšíň



Podpis autora práce

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

JUREČKOVÁ, N. *Eliminace vzniku vad při výrobě dílce Piezo A998: Bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2020, 37 s. Vedoucí práce: Hilšer, O.

Tato bakalářská práce se zabývá problémem eliminace vad při procesu lisování. Teoretická část je zaměřena na problematiku lisování práškových materiálů a dále popisuje technologický postup výroby dílce Piezo A998.

V praktické části je popisována konstrukční změna adaptoru, lisovacího nástroje a příslušenství při lisování. Na závěr jsou shrnuty výsledky a analýzy pokusu.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

JUREČKOVÁ, N. *Elimination of Defects in Production of Piezo A998: Bachelor Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2020, 37 p. Thesis head: Hilšer O.

This bachelor thesis deals with the problem of elimination defects during the forming process. The theoretical part of thesis is focused on issues of powder metallurgy forming and further it is describing the technological process of component PiezoA998 production.

The practical part of thesis is describing the design change of the adaptor of forming tool and the accessories for powder forming. The results and analyzes are summarized in the end of bachelor thesis.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	8
Seznam použitých zkratk	10
Úvod.....	11
1. Představení firmy TDK Electronics s. r. o.....	12
1.1. Historie firmy	12
1.2. Výroba	12
1.2.1. Feritová jádra	12
1.2.2. Pozistory.....	13
2. Speciální keramické materiály	14
2.1. Rozdělení keramiky.....	14
2.1.1. Podle chemického složení.....	14
2.1.2. Podle použití	15
2.2. Titaničitan barnatý	16
3. Lisování práškových materiálů.....	17
3.1. Procesy probíhající při lisování prášku.....	17
3.2. Pístové lisování.....	18
3.3. Přetokové lisování.....	20
3.4. Izostatické lisování (CIP).....	21
3.5. Žárové lisování	22
3.6. Izostatické žárové lisování (HIP).....	23
4. Technologický postup výroby dílce Piezo A998.....	24

4.1. Výroba prášku a následná úprava	25
4.2. Lisování	25
4.3. Sintrace	26
4.4. Lapování	26
4.5. Metalizace	27
4.6. Pólování.....	28
4.7. AOI 100% kontrola a balení	29
5. Návrh konstrukčních opatření pro omezení vzniku vad	30
5.1. Cíle práce.....	30
5.2. DMAIC	30
Závěr	31
Seznam použité literatury	34
Seznam obrázků	36
Seznam tabulek.....	37

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Název	Jednotka
C_p	index způsobilosti	
C_{pk}	index způsobilosti	
C_{pm}	index způsobilosti	
CPL	dolní index způsobilosti	
CPU	horní index způsobilosti	
F	lisovací síla	[N]
H_s	výška vylisované součástky	[mm]
H_v	sypná výška	[mm]
k	hustota kompaktního tělesa	[kg.m ⁻³]
LCL	dolní regulační mez	
LSL	dolní specifikační mez	
P	tlak	[MPa]
P_p	index výkonnosti	
P_{pk}	index výkonnosti je-li brána v úvahu poloha procesu	
PPL	dolní index výkonnosti	
PPU	horní index výkonnosti	
S	celková lisovací plocha	[m ²]
s	sypná hustota práškového materiálu	[kg.m ⁻³]
TAR	cílová hodnota procesu	
UCL	horní regulační mez	

USL horní specifikační mez

q součinitel plnění

Seznam použitých zkratk

AOI – automated optical inspection (automatická optická kontrola)

CIP - Cold Isostatic Pressure (Izostatické lisování)

HIP – Hot Isostatic Pressure (Izostatické žárové lisování)

SPC - Statistic Process Control (statická regulace procesu)

Úvod

Bakalářská práce je zaměřena na možnosti snížení zmetkovitosti výrobku Piezo A998. Daný díl se vyrábí pomocí práškovou metalurgií ve firmě TDK Electronics s. r. o. se sídlem v Šumperku. Aplikační využití produktů lze nalézt v oblasti parkovacích senzorů do elektromobilů, výroby automatických praček, tavicích pistolí, apod. S ohledem na konkurenci, která je na trhu, je prioritou firmy snížení počtu neshodných výrobků na minimální hodnotu, jelikož vady (odchylky) výrobku významně navyšují prodejní cenu daného dílu a v důsledku snižují konkurence schopnost podniku na trhu.

Výroba prezentovaného dílu je z časového i finančního hlediska náročná, jelikož musí být použito velké množství technologií, které jsou nezbytné pro zajištění výroby dílců odpovídající kvality. Každá z technologií výroby dílce je klíčová a podílí se na výsledné kvalitě výrobku. Míchání, potažmo sušení granulátu s následným lisováním metodou CIP (Cold Isostatic Pressure) a následný výpal. Největší procento neshodných výrobků vzniká v důsledku chyb při lisování a následném výpalu. Je tedy zřejmé, že klíčovými úseky pro možnost optimalizace výroby s ohledem na možnost snížení neshody výrobků jsou výrobní operace lisování prášku a výpal výlisku.

Celá řada faktorů může ovlivňovat kvalitu výrobku, nejenom použité technologie, ale faktory jako vlhkost, přídavný materiál, teplota a samozřejmě chyby vznikající v důsledku lidského faktoru. Je tedy zásadním přínosem odhalení kritických míst ve výrobním postupu a jejich eliminací dosažení kvalitativně odpovídajících výrobků, které budou v rámci porovnání s konkurencí pokud možno na vyšší úrovni.

1. Představení firmy TDK Electronics s. r. o.

1.1. Historie firmy

Historie společnosti sahá do roku 1989, kdy vznikl společný podnik Siemens a Matsushita Components A.G. se sídlem v Mnichově [1].

Tato společnost se v roce 1999 přejmenovala na EPCOS A.G. V téže roce provedla akvizici části výroby společnosti Pramet a.s., Šumperk a vytvořila dceřinou společnost EPCOS s.r.o. s cílem vytvořit v Šumperku evropské centrum pro výrobu feritů z magnetických měkkých materiálů [1].

V roce 2000 byla na zelené louce dokončena výstavba nových výrobních hal určených pro převzetí výrobních technologií a zahájena výroba širokého sortimentu feritů a dalších elektronických součástek [1].

V roce 2009 se mateřská společnost šumperského výrobního závodu EPCOS A.G. Mnichov sloučila s částí společnosti TDK, která se zabývá výrobou stejného typu výrobků. Firma TDK Electronics s.r.o. je součástí tohoto nadnárodního koncernu [1].

1.2. Výroba

V TDK Electronics se vyrábí elektronické součástky a komponenty, které se nacházejí téměř ve všech elektrických a elektronických zařízeních kolem nás. Mají zásadní význam pro zajištění spolehlivého napájení, zpracování elektrických signálů a chrání obvody před selháním a poruchou [1].

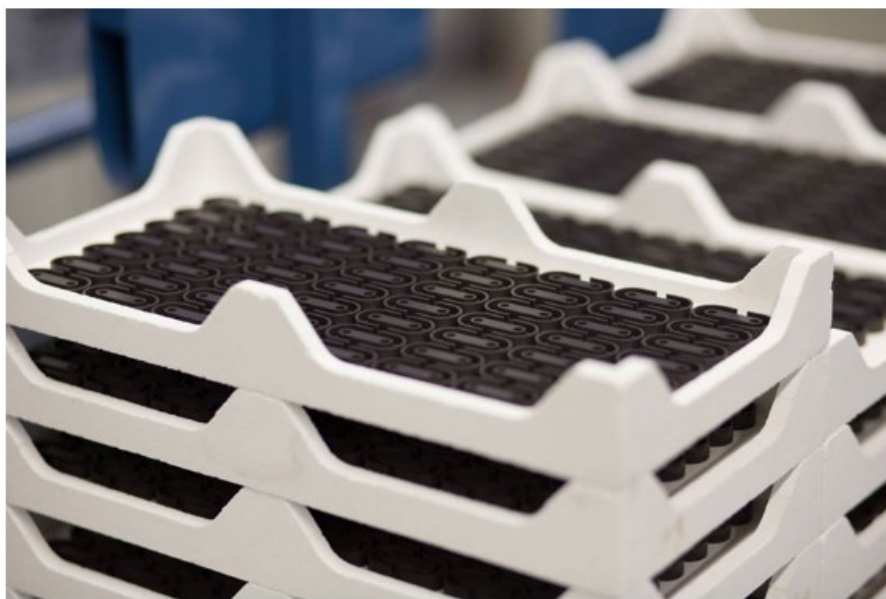
Společnost je držitelem certifikátů EN ISO 14001:1996 a ISO/TS 16949:2016, které jsou nezbytné pro uskutečňování dodávek pro automobilový průmysl. Prioritou společnosti je uspokojování očekávání, přání a požadavků zákazníků vysokou kvalitou svých výrobků a služeb [1].

Podnik v Šumperku je zaměřen na výrobu feritových jader a pozistorů [1].

1.2.1. Feritová jádra

Divize MAG (Magnetics Business Group) vyrábí feritová jádra a její vedení sídlí v německém Heidenheimu. Feritová jádra se využívají jako součástky zdrojů elektrického napětí (transformátory), výkonových měničů pro solární, lékařskou a dopravní techniku, v telekomunikačním průmyslu, v přístrojích a zařízeních k měření spotřeby elektrického

proudu, také k bezdrátovému přenosu energie [1]. Příklad feritového jádra je uveden na Obr. 1.



Obrázek 1 Feritová jádra [1]

1.2.2. Pozistory

Divize PPD (Piezo and Protection Devices Business Group) se zabývá výrobou keramických pozistorů a má sídlo v rakouském Deutschlandsbergu. Keramické pozistory (vzorový příklad je uveden na Obr. 2) nacházejí uplatnění jako vyhřívače sedaček automobilů, teplotní senzory, senzory hladiny kapaliny, přepět'ová ochrana, v parkovacích senzorech a nově i v elektroautomobilech [1].



Obrázek 2 Příklad pozistoru [1]

2. Speciální keramické materiály

S rozvojem technologií a materiálového inženýrství mají keramické materiály důležité postavení v mnoha oblastech použití, zahrnující oblasti: elektroniky, komunikace, letectví, kosmonautice, životního prostředí, energie aj. Mnoho z nově navrhovaných a vyvíjených keramických produktů má obrovský význam jak pro každodenní tak průmyslové využití. Od poloviny 20. století bylo vyrobeno mnoho druhů keramiky s použitím vstupních surovin přísně kontrolovaného chemického složení. Představuje keramiku poskytující výrobky se zcela specifickými vlastnostmi. Tato keramika je charakterizována teplotními, mechanickými, elektromagnetickými, optickými a biologickými funkcemi. Při její výrobě se vychází ze syntetických, až analytických čistých surovin, zvláštních vytvářecích technik a způsobu výpalu i na velmi vysoké teploty. Výrobky speciální a konstrukční keramiky vykazují takové mimořádné vlastnosti, že přímo způsobily zvrat v některých oborech [2].

2.1. Rozdělení keramiky

Rozdělení keramických materiálů lze z mnoha hledisek. Pro podmínky praktického využití se používá rozdělení do dvou skupin:

- **podle chemického složení**
- **podle použití**

2.1.1. Podle chemického složení

Dělením dle chemického složení keramických materiálů hovoříme nejčastěji o oxidové keramice, kde především keramika na bázi Al_2O_3 nachází široké uplatnění. Z pohledu elektrotechniky je zejména s ohledem na velikost odporu při vyšších teplotách zajímavá soustava Ba-Ti. V Tab. 1 je uvedeno rozdělení keramických materiálů dle chemického složení.

Tabulka 1 Rozdělení keramiky podle chemického složení [2]

<i>Oxidová keramika</i>	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , ZrO ₂ , MgO, Fe ₂ O ₃ , BeO, CaO, TiO ₂ , SnO ₂ , ThO ₂ , PuO ₂ , UO ₂ , oxidy vzácných zemin
<i>Neoxidová keramika</i>	Karbidy (SiC, B ₄ C, TiC, ZrC, Mo ₂ C, VC, WC, ThC, HfC, NbC)
	Nitridy (BN, Si ₃ N ₄ , TiN, ZrN, TaN, UN, ThN, SiAlON)
	Boridy (Ti ₂ B, ZrB ₂ , TaB ₂ , HfB ₂ , ThB ₂)
	silicidy (MoSi ₂ , ZrSi, ZrSi ₂ , Ti ₅ Si ₃ , TaSi ₂ , TiSi ₂)
<i>Titaničitá keramika</i>	BaTiO ₃ , SrTiO ₃ , CaTiO ₃
<i>Sulfidová keramika</i>	BaS, CeS, US, ThS, CdS, ZnS
<i>Kovokeramika-cermety</i>	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , MgO, BeO, ThO ₂ , Y ₂ O ₃ + W, V, Mo, Ta, Ti, Zr, Si, Cr, Co, Ni, Nb

2.1.2. Podle použití

Keramické materiály v současné době nacházejí velké uplatnění v širokém aplikačním rozsahu. S ohledem na specifické vlastnosti keramiky ji lze dělit na:

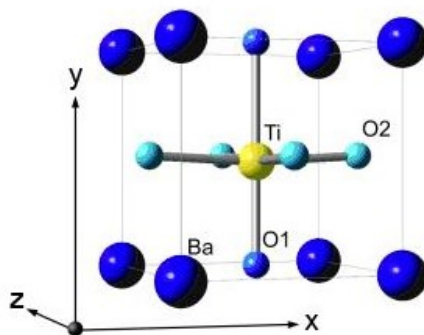
- ***Elektrické***
- ***Optické***
- ***Biologické***
- ***Magnetické***
- ***Teplotní***
- ***Nukleární***
- ***Chemické***
- ***Mechanické***

2.2. Titaničitan barnatý

Vlastní práce je zaměřena na výrobu dílců z BaTiO_3 a tato keramika je níže detailně popsána.

Titaničitan barnatý patří bezesporu k nejvíce prozkoumaným feroelektrickým materiálům. Patří do skupiny perovskitů. Vyznačuje se jednoduchou strukturou, která umožňuje sledování fázových přechodů, feroelektrických a jiných vlastností při snadno dosažitelných teplotách. Titaničitan barnatý lze připravit jako monokrystal nebo jako keramický materiál a využít jej v řadě aplikací. Pro fyzikální výzkum jsou vhodnější ve většině případů monokrystaly BaTiO_3 , přičemž pro tuto metodu výroby byla vypracována řada metod. Nejpoužívanější metoda je pěstování z dvousložkových nebo trojsložkových tavenin, kde je rozpouštědlem cizí látka. Tato kategorie zahrnuje Blattnerovu metodu, při které se BaCO_3 , respektive BaO , a TiO_2 , rozpouští v tavenině BaCl_2 při teplotách nad 100°C . Při pozvolném ochlazování je možné sledovat růst krystalů tvaru hranolků o délce kolem 2 mm. Vůbec nejúspěšnější metoda je Remeikova, která navrhuje pěstovat monokrystal z roztoku BaTiO_3 v tavenině při zvyšující se teplotě do cca 1200°C , kde je u velkých krystalů velikost až 2 cm. Hlavní výhodou pěstování krystalu BaTiO_3 je, že vykazují poměrně malá vnitřní pnutí a jednoduchou doménovou strukturu [3].

BaTiO_3 má krystalickou mřížku perovskitového typu (Obr. 3). Perovskit je minerál o složení CaTiO_3 , kubické struktury se středem symetrie. Feroelektrický fázový přechod u něho nebyl zjištěn. Naproti tomu u BaTiO_3 byl zjištěn bohatý polymorfismus. Titaničitan barnatý se při různých teplotách vyskytuje v pěti krystalografických modifikacích [3].

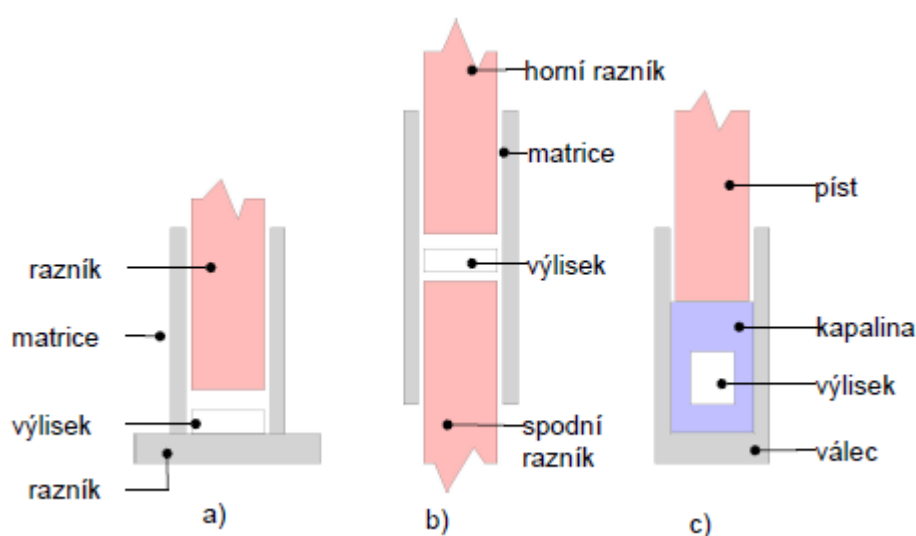


Obrázek 3 Krystal titaničitanu barnatého [3]

3. Lisování práškových materiálů

Z hlediska výsledných vlastností je důležitou technologickou operací kompaktování (lisování) keramického prášku do celistvých bloků, které se dále zpracovávají.

Účelem lisování prášků je dosažení částečně zhutněného základního tvaru budoucího výrobku před jeho spékáním působením tlakové síly. Způsob lisování, druh lisovacích nástrojů a lisovací tlak závisejí na spékaném materiálu, rozměrech, tvaru a účelu výrobků. Zhutňovat prášky je možné různými způsoby. Podle toho z kolika stran je materiál podroben tlaku, rozlišujeme lisování jednostranné (obr. 4a), oboustranné (obr. 4b) a všestranné (obr. 4c) [4,5].



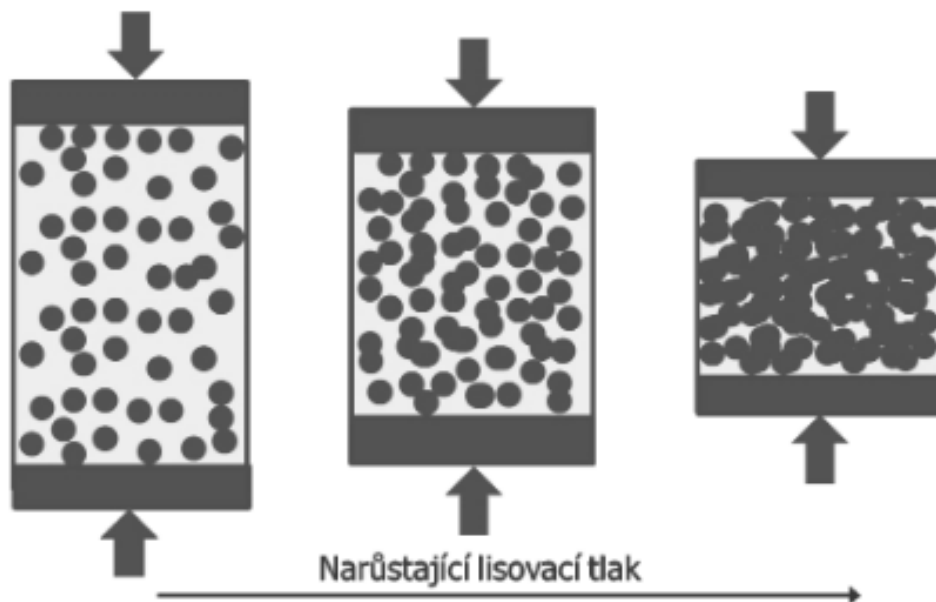
Obrázek 4 Základní způsoby lisování [4]

3.1. Procesy probíhající při lisování prášku

Pokud se nebude přihlížet ke gradientům napětí a hustoty, které jsou zapříčiněny třením na stěnách matrice, je docílená hustota výlisku jen funkcí tlaku. S rostoucím tlakem probíhají ve výlisku následující pochody (obr. 5) [6]:

- Dochází k uspořádání částic, odstraňují se vzniklé shluky (mosty) a zaplňují se dutiny (Obr. 5 vlevo).
- Zvětšuje se kontakt mezi částicemi v důsledku plastické deformace a povrch částic se vyrovnává. Oxidační vrstva se trhá a mechanickým spojením částic dochází k tvorbě jejich aglomerátu. Částice se zpevňují (Obr. 5 uprostřed).

- Při dalším vzrůstu tlaku dochází ke zvětšení kontaktní plochy mezi částicemi a dalšímu zpevnění částic, zvětšuje se adheze mezi částicemi a částice, u kterých byla vyčerpána jejich plasticita, se rozpadají (Obr. 5 vpravo).



Obrázek 5 Pochody probíhající ve výlisku s rostoucím tlakem [6]

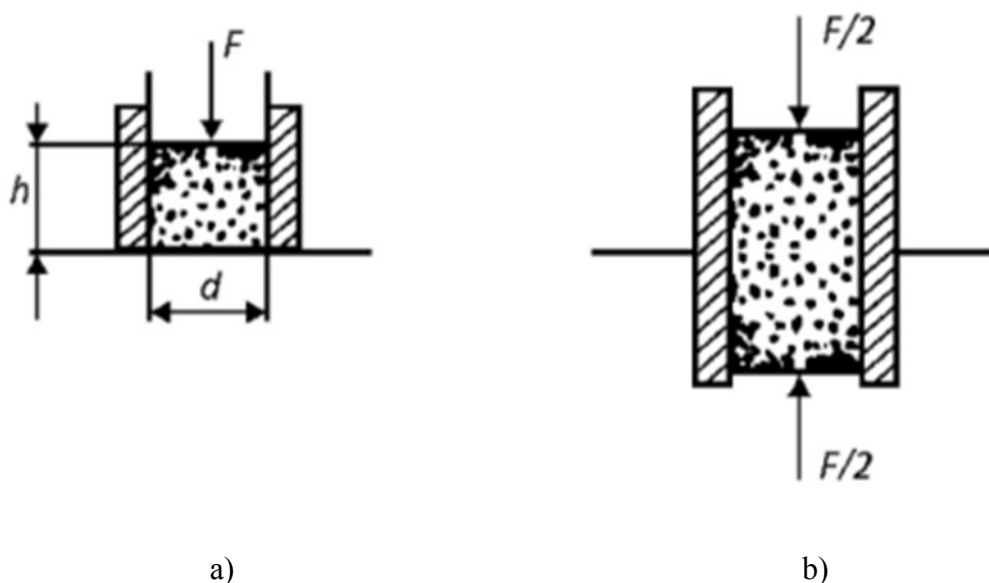
Výlisky lze lisovat z:

- z vlhkých směsí s obsahem 15 až 18 % vody a s organickými lisovacími přísadami,
- z polosuchých směsí s obsahem 8 až 15% vody s bezvodým rozpouštědlem a organickými pojivy
- ze suchých směsí s obsahem < 4 až 8 % vody nebo organických pojiv pístovým nebo izostatickým způsobem [2].

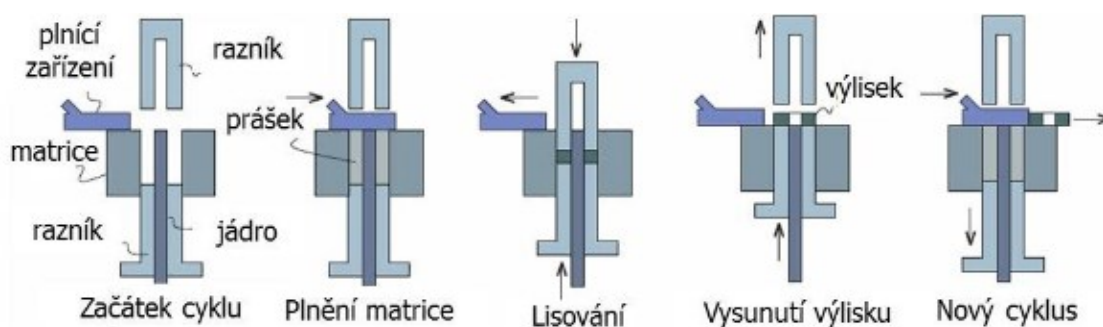
3.2. Pístové lisování

Jedná se technologii, které je vhodná k sériové výrobě a automatizaci. Používá se pro výrobu rozměrově přesných výlisků. Nejčastěji se při této technologii lisuje na mechanických a hydraulických lisech. Jako nástroj pro lisování slouží horní razník, spodní razník a matrice. Vlastnosti výlisku částečně závisí na způsobu lisování. Nejčastější způsob lisování v matrici je:

- Jednostranné lisování - nejjednodušší způsob lisování na mechanických lisech. Pohyb provádí pouze horní razník. Matrice a spodní razník se nehýbou (obr. 6a).
- Dvoustranné lisování - lisovací pohyb provádí oba razníky, díky tomu lze dosáhnout rovnoměrnější distribuce hustoty (obr. 6b). Uprostřed výlisku je hustota nejmenší, směrem k razníkům se hustota zvyšuje [5,6,7]. Jednotlivé fáze dvoustranného lisování jsou uvedeny na Obr. 7.



Obrázek 6 Způsoby lisování v matricích [7]



Obrázek 7 Jednotlivé fáze dvoustranného lisování [6]

Vlastní lisování lze rozdělit na 2 způsoby:

- Lisování stálým tlakem – provádí se na hydraulických lisech, které se nastaví na požadovaný maximální lisovací tlak. Výhodou je rovnoměrná hustota výlisků. Nevýhodou je proměnná výška výlisků. Výpočet lisovací síly dle (1):

$$F = S \cdot p \quad (1)$$

kde F – lisovací síla (N), S - celková lisovaná plocha (m^2), p -lisovací tlak ($N \cdot m^{-2}$)

- Lisování na stálou výšku – provádí se na mechanických lisech s konstantně nastaveným zdvihem razníku. Hustota výlisku kolísá, výška je konstantní. Stanovení sypné výšky je možné dle vzorce (2):

$$H_v = H_s \cdot q \quad (2)$$

kde H_v - sypná výška (mm), H_s – výška vylišované součástky (mm), q -součinitel plnění ($q=k/s$); k -hustota kompaktního tělesa ($kg \cdot m^{-3}$), s -sypná hustota práškového materiálu ($kg \cdot m^{-3}$).

Cílem lisování je vysoká hustota výlisku. Vysoká hustota zajišťuje lepší pevnost pro manipulaci s výlisky a menší smrštění při slinování [5,6,7].

3.3. Přetokové lisování

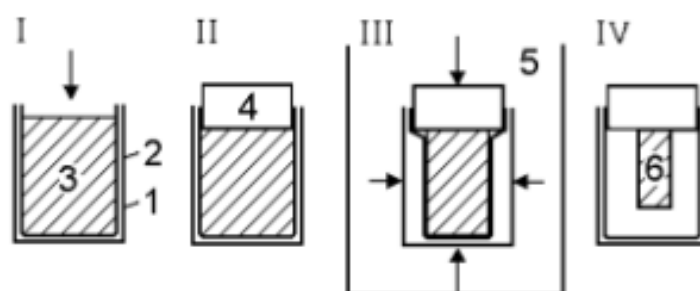
Přetokové lisování je způsob tvarování s přebytkem vlhké keramické směsi; drolenky ($W = 15$ až 21%), do otevřených kovových forem. Lisovací drolenka se vrší v přebytku nad dutinou formy. Hloubka dutiny lisovací formy je shodná s výškou výlisku. Razník skončí lisování uzavřením formy. S pohybem razníku ve směru k formě přebytek směsi nejdříve volně uniká do stran, ale postupně se zvyšuje odpor proti jejímu unikání. Lisovací tlak se tak zvyšuje a dosáhne maximální hodnoty těsně před uzavřením formy. Jakmile lisovací tlak překročí mez toku, začne se lisovací směs chovat jako nestlačitelná newtonská kapalina. Tlak se v ní šíří všemi směry a vyplní i složité tvary formy. Při vysokém obsahu vlhčiva v lisovací směsi se dosahuje lisovacích tlaků $p = 5$ až 8 MPa. Výlisek se musí snadno vyjímat z formy a mít dostatečnou mechanickou pevnost po vylišování i po vysušení. Přetokové lisování je využíváno především pro relativně malá keramická tělesa složitých tvarů s nižšími nároky na mechanické vlastnosti než při lisování

pístovém. Hlavní výhodou tohoto způsobu lisování jsou nízké náklady na konstrukci lisovacích forem a nástrojů [5].

3.4. Izostatické lisování (CIP)

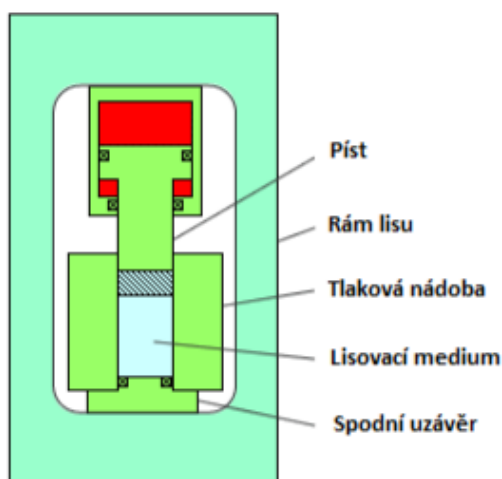
Metoda vhodná pro větší a komplexnější tvary, které na druhou stranu nesmí být příliš velké a příliš komplikované. Tlak pro keramiku je kolem 200 MPa. Izostatické lisování se dělí na:

- Mokré formy – lisovaná směs v pružném vakuu vkládána společně s manžetou volně do kapaliny v tlakové nádobě. Hydrostatický tlak je vyvíjen pomocí kapalného média ve všech směrech (Obr. 8-9).



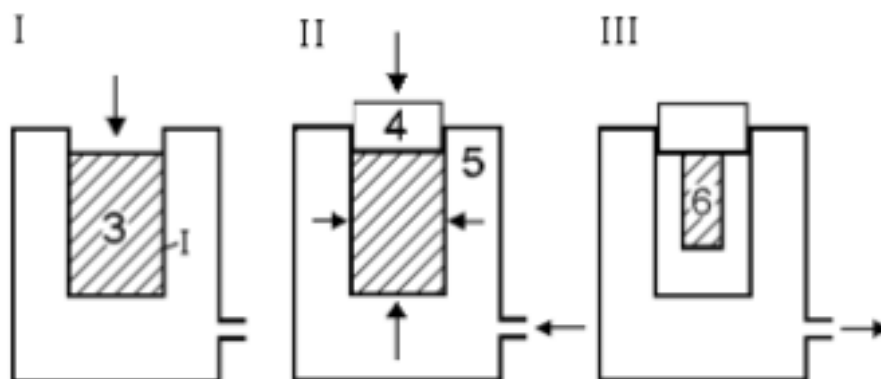
Obrázek 8 Izostatické lisování v mokré formě [5]

1 – elastický vak, 2 – kovová děrovaná manžeta, 3 – lisovací směs, 4 – zátka, 5 – nádoba s kapalinou, 6 – výlisek, I – plnění vaku směsí, II – uzavření vaku se směsí před uzavřením formy, III – zalisování, IV – vylisovaný výrobek



Obrázek 9 Principiální schéma izostatického lisování za studena [5]

- Suché formy – při lisování suché formy je pružná lisovací nádoba pevně spojena s tlakovou nádobou (Obr. 10). Spojení umožňuje lisování menších výlisků složitějších tvarů [5,6].

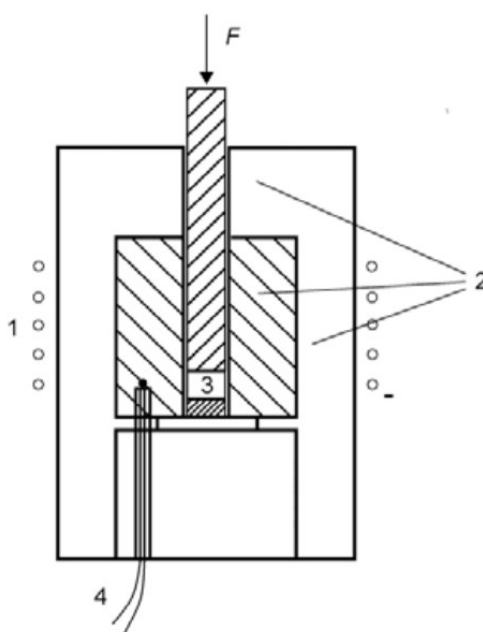


Obrázek 10 Izostatické lisování v suché formě [5]

1 – elastický vak, 3 – lisovací směs, 4 – zátk, 5 – nádoba s kapalinou, 6 – výlisek, I – plnění vaku směsí, II – lisování, III – vylisovaný výrobek

3.5. Žárové lisování

Při tomto způsobu lisování se lisuje vysokým tlakem v grafitových formách při teplotách 1200 - 2000°C v ochranné atmosféře inertního plynu. Využívá se poznatku, že při zvyšování teploty dochází ke zvýšení pevnosti v tahu R_t grafitu. Ta dosahuje při pokojové teplotě pouze 28 MPa, při teplotě 2500°C se zvyšuje až na hodnotu 490MPa [5].



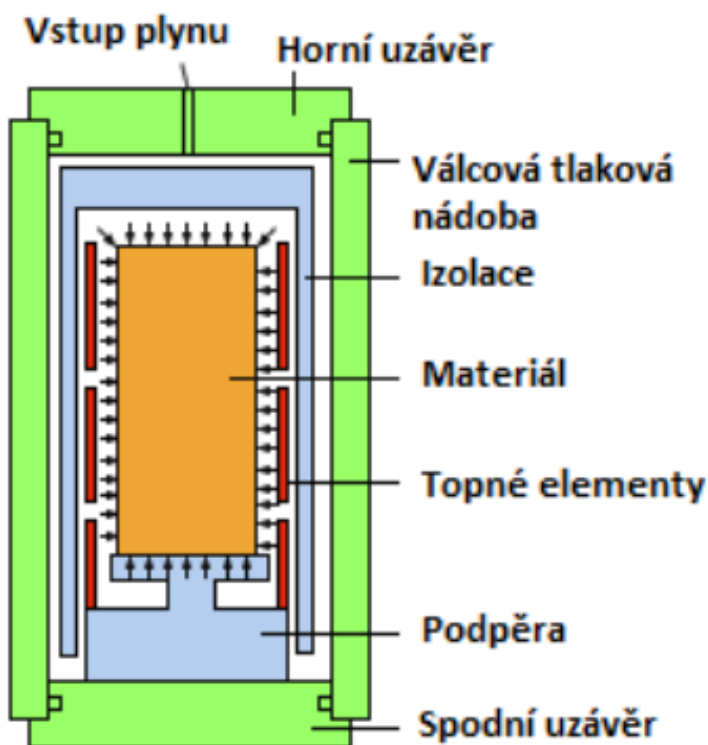
Obrázek 11 Schéma procesu žárového lisování [5]

1 – elektrická pec, 2 – grafitová forma, píst a podložkou, 3 – výlisek, 4 – termočlánek, F – lisovací síla

3.6. Izostatické žárové lisování (HIP)

HIP představuje způsob lisování pro možnost dosažení výlisků s požadovanou mikrostrukturou a s vysokými mechanickými pevnostmi.

Tlak 10 - 200 MPa je vyvíjen horkým plynem. Požadovaný výrobek daného tvaru se nejprve vylisuje pístovým nebo izostatickým lisováním. Následně je výlisek uzavřen do pouzdra, které nepropouští inertní lisovací plyn. Takto uzavřený výlisek se vloží do tlakové nádoby s lisovacím plynem a vypaluje se na požadovanou teplotu. Zahřátý plyn vyvíjí na výlisky potřebný všestranný lisovací tlak [2,5,6].



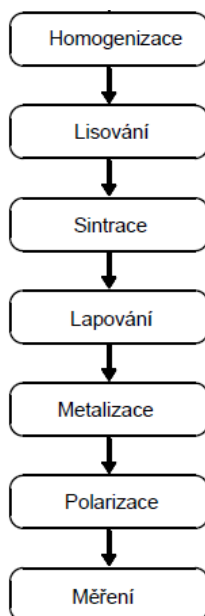
Obrázek 12 Principiální schéma izostatického lisování za tepla [6]

4. Technologický postup výroby dílce Piezo A998

Piezo keramika je často označovaná jako funkční keramika. Slouží k převádění mechanických parametrů na parametry elektrické a naopak. To znamená, že v čidlech umožňují převádět síly, tlaky a zrychlení na elektrické signály a ve zvukových, ultrazvukových převodnících a ovladačích přeměňuje elektrické signály na vibrace či deformace.

Výroba produktu je poměrně složitá, prochází několika výrobními technologiemi (viz. schéma sledu operací v Obr. 13). Výroba zahrnuje přípravu prášku, kde se smíchají všechny potřebné materiály, díky kterým dosahuje předepsaného chemického složení výrobku. Prášek se v Šumperku pouze homogenizuje. Následuje proces lisování za sucha na pístovém mechanickém lisu. Keramický polotovár se sintruje v průběžné peci při teplotě 1400 °C. Během sintrování vytváří výrobek svou polykrystalickou keramickou strukturu [8].

Sintrovaný výrobek je následně lapován, aby došlo k zajištění potřebné drsnosti a geometrických rozměrů. Geometrické rozměry a koeficienty materiálu určují jeho funkční charakteristiky, jako je kapacita a rezonanční frekvence. Elektrického připojení se docílí pomocí metalizace, kde se na výrobek nanáší stříbrná pájitelná metalizační pasta pomocí sítotisku, potom následuje sintrace po metalizaci. Dalším procesem je pólování, ve kterém je výrobek vystaven stejnosměrnému elektrickému poli při teplotě cca 100 °C, aby dosáhl správné orientace dipólu uvnitř výrobku. Následuje 100% výstupní kontrola a balení [8].



Obrázek 13 Sled technologických operací při výrobě dílce A998

4.1. Výroba prášku a následná úprava

Úprava práškového materiálu je základem přípravy suroviny. Primární je dosažení nejvhodnější granulometrie tj. požadované velikosti částic a jejich následná co nejdokonalejší homogenizace. Vstupní suroviny je potřeba nejprve upravit zdrobňováním, tj. drcením a mletím na požadovanou maximální velikost zrna. Následuje homogenizace a zpracování složek pro dosažení vlastností výrobní směsi [2, 9].

V TDK Šumperk probíhá jenom homogenizace. Pro tento proces se používá homogenizační stroj a váha. Na váhu se vloží jednotlivé směsi, váha si sama naváží potřebnou hmotnost jednotlivých směsí podle předepsaného programu. Homogenizační stroj navážené směsi začne míchat cca 20 minut. Směs se nasype do připravených plastových sudů a je převezena do temperační místnosti nad lisovnou. Zde se udržuje teplota 20 °C.

4.2. Lisování

Lisování prášku je proces, při kterém se vytvoří polotovar pomocí lisovací síly. Dílec Piezo A998 se lisuje na mechanickém lise TPA 6 od firmy Dorst s lisovací silou 60kN (Obr. 14). Jedná se o suché dvoustranné pístové lisování (viz. kap. 3.2) Tvar polotovaru určují razníky s maticí.



Obrázek 14 Mechanický lis TPA 6

4.3. Sintrace

Sintrace neboli slinování neboli výpal se používá pro zpevnění polotovarů, jelikož u keramických prášků nebývá po suchém lisování zajištěná dostatečná pevnost. Hnací silou slinování je snaha systému o zmenšení celkové povrchové energie. Slinování je tepelně aktivovaný proces, při kterém dochází k snižování Gibbsovy energie systému. K jejímu snižování dochází zmenšováním fázového rozhraní tuhá fáze – plyn přechodem na energeticky výhodnější fázové rozhraní tuhá fáze – tuhá fáze. Tím vznikají hranice zrn. Sklesající velikostí částic roste jejich specifický povrch a slinování probíhá rychleji. Povrchová energie částic keramického materiálu je závislá na zakřivení povrchu. Se zmenšujícím se poloměrem, se zvyšuje podíl plochy povrchu. Sintrací získávají výrobky termoelektrické vlastnosti. [2].

Celý proces trvá cca 24 hodin. Sintrace se dělí na 3 fáze:

- **1. fáze předehřev** - při této fázi k tzv. odplyňování, které trvá 3,5 hodiny a slouží k odpaření organických pojiv a maziv. Tepota v peci při odplyňování je cca 300 °C. Při této fázi se v peci plynule zvyšuje teplota 6 hodin, až přejde na fázi 2.
- **2. fáze hlavní sintrovací teplota** – teplota v peci je cca 1400 °C a trvá 3 hodiny. V této fázi se intenzivně slinují granule, které způsobují smrštění finálního dílce o 18% vůči výlisku.
- **3. fáze ochlazování** – teplota v peci se snižuje a dochází k ochlazování výrobků. Tato fáze trvá nejdéle.

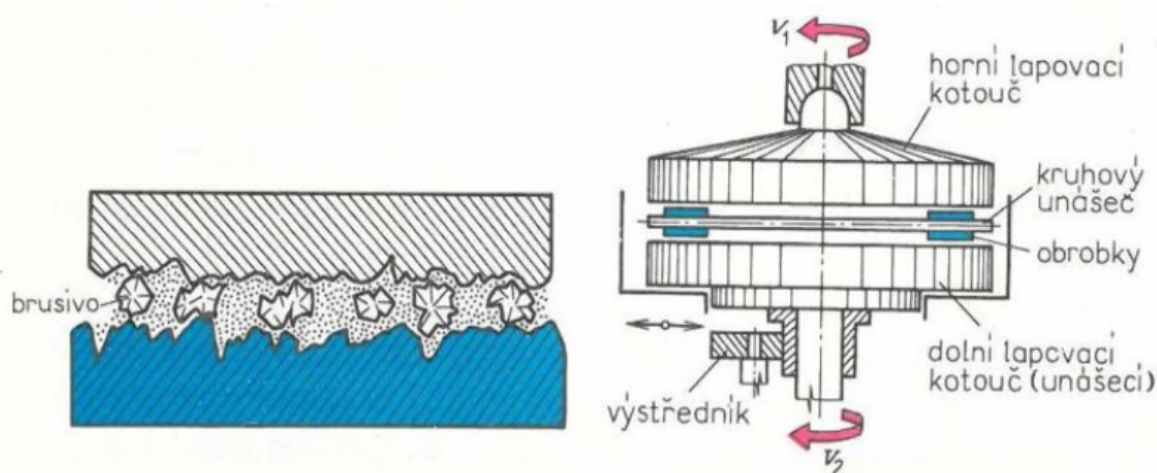
Výrobek Piezo A998 se vypaluje v průběžných tunelových pecích na tzv. keramických lodičkách. Před sintrováním je nutno nastavit vypalovací teplotu, teplotní režim a atmosféru v peci. Po sintraci se z kusů musí ručně obrousit zirkon, který se přidává na výlisky, aby se při sintraci do sebe nespekly [2, 10, 11].

4.4. Lapování

Podstatou lapování je vyhlazování povrchu výrobků jemným brusivem, které je volně rozptýleno v oleji, petroleji nebo je obsaženo v různých lapovacích pastách. Brusivo je dodáváno do prostoru mezi výrobek a nástroj. Řezným pohyb brusiva, který je vyvolán lapovacím nástrojem a současně plastickou deformací nerovností povrchu, se dosahuje zmenšení drsnosti povrchu a zlepšením geometrického tvaru. Brousící zrna jsou

přítlačována k lapovacímu povrchu výrobku měděnými nebo litinovými lapovacími nástroji, které se otáčejí a kmitají [12, 13]. Schematické zobrazení operace lapování je uvedeno na Obr. 15.

Horní kotouč je výkyvný, aby se jeho plocha mohla přizpůsobit ploše spodního kotouče a byla s ním rovnoběžná. Pracovní otáčky konají oba kotouče. Unášecí kotouč koná pohyb kmitaný, který je vyvolaný výstředníkem. Dílce jsou umístěny v tzv. „lapovacích klecích“ mezi lapovací kotouče. Lapování trvá 4,5 minuty, potom jdou výrobky do myčky, ze které putují do sušící pece, kde jsou 4 hodiny [12, 13].



Obrázek 15 Schéma lapovacího stroje a detail brusiva ve stroji [13]

4.5. Metalizace

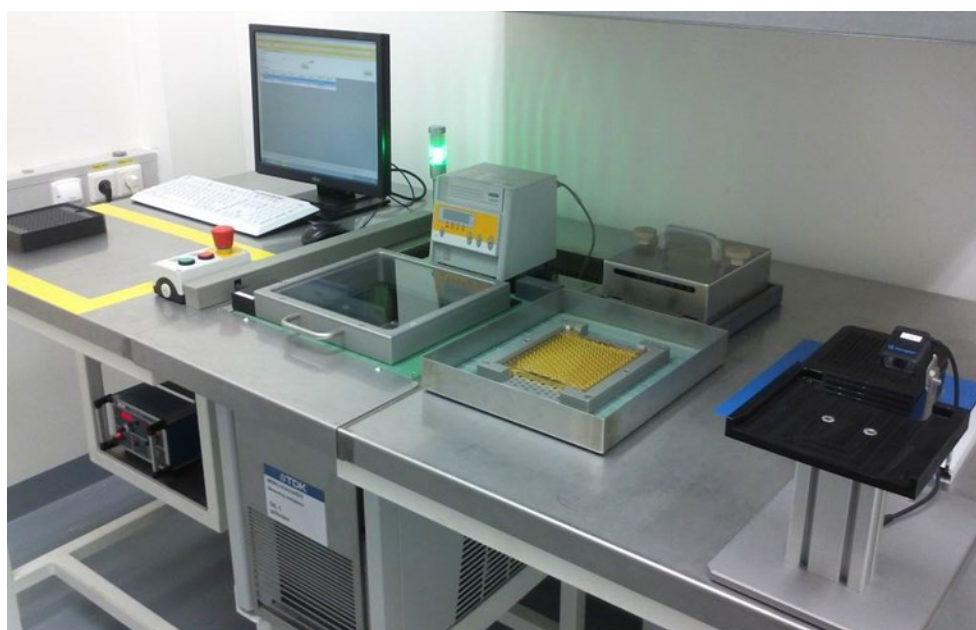
Keramické polovodiče Piezo A998 se musí metalizovat, aby mohly být zapojeny do elektrického obvodu. Výrobky se naloží do metalizační lísky a přes dopravník se pošlou do metalizačního stroje. V TDK je metalizační stroj EKRA X6 (Obr. 16). Nejprve projdou předehřívací stanicí, kde se zahřejí na správnou teplotu a odstraní se nečistoty. Uvnitř stroje se přes sítotisk pomocí stěrky nanáší metalizační pájitelná pasta stříbra celoplošně. Dále Piezo A998 putuje přes dopravník do sušící pece, kde zaschne metalizační pasta. Okružní chlazení zajistí ochlazení kusu po vysušení, potom se můžou lísky přetočit do blistrů a pak zpět do metalizační lísky. Naplněné lísky projdou stejný proces jako metalizace celoplošně, akorát tady probíhá metalizace z druhé strany s elektrodou. Nakonec se lísky naloží do průběžné pece a při teplotě 700 °C probíhá výpal po metalizaci.



Obrázek 16 Sítotiskový stroj EKRA X6

4.6. Pólování

Při pólování polovodičů je důležitá čistota, proto se po metalizaci umývají v ultrazvukové myčce. Potom se musí vysušit v sušící peci minimálně 5 minut při teplotě cca 150 °C. Až vychladnout, tak se vloží do olejové lázně. Dojde k uzamčení krytu. Probíhá přehřev. Jakmile čas přehřevu uplyne, spustí se pólovací proces – náběh napětí, výdrž a pokles napětí. Po napólování se musí líska usušit v sušící peci, aby se odpařily případné zbytky pólovacího oleje z kusů. Sušení probíhá při teplotě 150°C +/-5°C po dobu minimálně 15 minut. Pohled na pólovací linku je uveden v Obr. 17.



Obrázek 17 Pólovací linka

4.7. AOI 100% kontrola a balení

100% kontrola se skládá ze 3 cyklů. Měření na stroji CapnTan, Fres a AOI. Na těchto strojích se měří kapacita, tangenta, frekvence, odchylka rozměrů a vady.

Změřené kusy se naskládají pomocí vakuové pinzety do blistru. Naskládá se na sebe 10 plných blisterů a jeden prázdný na překrytí a vloží se do sáčku. Sáček s blistry se zavakuuje. Potom se zavakuuje ještě do jednoho sáčku. Takto nachystané kusy jsou připravené k zákazníkovi.

5. Návrh konstrukčních opatření pro omezení vzniku vad

5.1. Cíle práce

Výrobek Piezo A998 se lisuje na mechanickém lise TPA 6 od firmy Dorst. V lise je umístěn adaptor, který se nasadí na horní a spodní beran lisu. Adaptor slouží k uchycení razníků a matrice. Tvoří dráhu pro plnicí násypku, která sype do matrice prášek a následně kus vysune z adaptoru a lisu na odebírací automat. Na odebíracím automatu je připevněna kamera, která zaznamenává průměr a hustotu každého výlisku. Odebírací automat naskládá výlisku do keramických lodiček a posype je zirkonem. V tomto stavu putují výlisky na sintraci.

Tato práce se nejvíce zaměří na eliminaci zmetkovitosti při lisování, zde je problém největší a nejvíce prodražuje výrobu a následný prodej, protože špatný kus projde celou výrobou. Cílem práce je konstrukční změna adaptoru v lise, kde je špatné vedení matrice a razníků. Po vylisování mají kusy rozdílnou hmotnost, hustotu a průměr. Toto všechno jsou vady, které nejsou přípustné a má na ně velký vliv nepřesné vedení adaptoru.

Konstrukční změny by měly vést ke zlepšení stability adaptoru, zmenšení zmetkovitosti, úbytku rozbitých razníků a matric a zkrácení času skládání adaptoru s lisovacím nástrojem.

5.2. DMAIC

Jedna z metodik Six Sigma, zaměřena na proces řízení. Metodu je možné využít pro jakékoliv řešení problému nebo zavedení nových změn. Tuto metodu jsme se dohodli použít na pokusu snížení vad při lisování [14].

Metoda má 5 fází pro úspěšné zavedení změny do výroby:

- **D – Define (definovat)** – v první fázi se definují cíle, shromažďují informace, popisuje se aktuální stav a proces, definuje se plán [14].
- **M – Measure (měřit)** – při zavádění nových změn do procesu jsou důležité postupné měření. Musí se doložit plnění cíle [14].
- **A – Analyze (analyzovat)** – zjištěné informace a měření je potřeba analyzovat a zjistit skutečný potenciál pro zlepšení. Analýza příčin problémů [14].

- **I – Improve (zlepšovat)** – odstranění skutečné příčiny, optimalizace a nastavení procesu. Dělá se pro zvýšení spokojenosti výrobce, zákazníka. Zlepšení nákladů [14].
- **C – Control (řídit)** – pokud se problém vyřeší, nebo dojde aspoň ke zlepšení, je potřeba všechny změny zavést do procesu a standardizovat [14].

Jelikož jsme se rozhodli o konstrukční změny, museli jsme si metodu DMAIC upravit na náš problém. Měření a analýzu jsme prováděli rovnou na novém i původním adaptoru, protože jsme již z minulosti věděli, co je potřeba konkrétně změnit, tudíž by nás tato fáze zbytečně zdržela. Fázi zlepšení jsme provedli už při první fázi, dohromady s definováním problémům.

S ohledem na citlivost informací a výsledků měření, které jsou předmětem této práce je zbytek uveden v **Technické zprávě** [15].

Závěr

Bakalářská práce je zaměřena na detailní rozbor problematiky výroby keramických pozistorů. Celý proces výroby pozistoru je z technologického hlediska komplikovaný a obsahuje velké množství kritických míst, kde existuje vysoká možnost vzniku neshodných výrobků.

Pro zajištění zvýšení geometrické přesnosti výrobků byly navrženy konstrukční úpravy na lisovacím stroji, které se dle prezentovaných výsledků jednoznačně prokázali jako vhodné. V porovnání s původním konceptem sestavy lisovacích nástrojů a podpůrných systémů bylo detailním měřením rozměrů výlisků prokázáno, že upravená sestava lisovacích nástrojů významně ovlivňuje rozměrovou přesnost výlisků.

V celém kontextu výroby je důležité detailně zkoumat všechna kritická místa. Konstrukční řešení má významný vliv na dosahovanou rozměrovou přesnost a v tomto kontextu také na hmotnost výlisku. Je ovšem zřejmé, že významnou roli při vzniku neshodných výrobků zastávají i jiné faktory, které ovšem lze je obtížně eliminovat. Z tohoto důvodu bych navrhovala se v budoucích optimalizačních pracích zaměřit na problematiku údržby lisovacích nástrojů a vliv lidského faktoru na přesnost keramických výlisků.

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Ondřeji Hilšerovi za cenné rady a pomoc při tvorbě bakalářské práce. Také děkuji všem zaměstnancům TDK Šumperk, kteří mi pomohli s testováním pokusu.

Seznam použité literatury

- [1] TDK Electronics AG 2019 [online]. [cit. 04. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.pracevtdk.cz/>
- [2] OVČÁČÍKOVÁ, Hana; VLČEK, Jozef. Speciální keramické materiály. Vyd. 1. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013. 111s. ISBN 978-80-248-3365-1
- [3] BŘEZINA, Bohuslav. Feroelektrika. 1. vyd. n. p., Praha: Academia, 1973. 200 s. ISBN 21- 018-73.
- [4] CARTER, C. Barry; NORTON M. Grant. Ceramic materials: science and engineering. 2nd ed. New York: Springer, 2013. ISBN 978-1-4614-3522-8.
- [5] HANYKÝŘ, Vladimír; KUTZENDORFER, Jaroslav. Technologie keramiky. 2. vyd. Praha: Silikátový svaz, 2008. 387 s. ISBN 978-80-86821-48-1.
- [6] SKOTNICOVÁ, Kateřina, KURSA Miroslav. Prášková metalurgie: studijní opora. Vyd. 1. Ostrava: VŠB -Technická univerzita Ostrava, 2013. 153s. ISBN 978-80-248-378-1.
- [7] HLAVÁČ, Jan. Základy technologie silikátů. Praha : SNTL, 1988. 516s.
- [8] Proces výroby piezokeramiky. [online], [cit. 2020-05-11] Dostupné z: <https://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/piezo-ceramics/manufacturing-process/>
- [9] ACOSTA, Matias a kol. BaTiO₃-based piezoelectrics: Fundamentals, current status, and perspectives. *Applied Physics Reviews*. 2017, roč. 4, 54 s. ISSN 1931-9401.
- [10] SNELLING, E. C. Soft ferrites: properties and applications. 1969. London: Iliffe, 1969. ISBN 9780408027601.
- [11] GOLDMAN, Alex. Modern ferrite technology. 2nd ed. New York, NY: Springer, 2005. ISBN 0387294139
- [12] KARAFIÁTOVÁ, Stanislava a Ivo LANGER. *Nekonvenční technologie*. 1. vyd. Havlíčkův Brod : FRAGMENT, 1998. ISBN 80-7200-296-1.
- [13] NĚMEC, Dobroslav a kol. *Strojírenská technologie 3: Strojní obrábění*. 2., opr. vyd. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982.

- [14] DMAIC metoda. [online], [cit. 2020-05-11] Dostupné z:
<https://www.vlastnicesta.cz/metody/dmaic-metoda-1/>
- [15] JUREČKOVÁ, N. *Eliminace vzniku vad při výrobě dílce Piezo A998: Technická zpráva*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2020, 62 s. Vedoucí práce: Hilšer, O.

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 Feritová jádra [1]</i>	13
<i>Obrázek 2 Příklad pozistoru [1]</i>	13
<i>Obrázek 3 Krystal titaničitanu barnatého [3]</i>	16
<i>Obrázek 4 Základní způsoby lisování [4]</i>	17
<i>Obrázek 5 Pochody probíhající ve výlisku s rostoucím tlakem [6]</i>	18
<i>Obrázek 6 Způsoby lisování v matricích [7]</i>	19
<i>Obrázek 7 Jednotlivé fáze dvoustranného lisování [6]</i>	19
<i>Obrázek 8 Izostatické lisování v mokré formě [5]</i>	21
<i>Obrázek 9 Principiální schéma izostatického lisování za studena [5]</i>	21
<i>Obrázek 10 Izostatické lisování v suché formě [5]</i>	22
<i>Obrázek 11 Schéma procesu žárového lisování [5]</i>	22
<i>Obrázek 12 Principiální schéma izostatického lisování za tepla [6]</i>	23
<i>Obrázek 13 Sled technologických operací při výrobě dílce A998</i>	24
<i>Obrázek 14 Mechanický lis TPA 6</i>	25
<i>Obrázek 15 Schéma lapovacího stroje a detail brusiva ve stroji [13]</i>	27
<i>Obrázek 16 Sítotiskový stroj EKRA X6</i>	28
<i>Obrázek 17 Pólovací linka</i>	28

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 Rozdělení keramiky podle chemického složení [2].....</i>	<i>15</i>
---	-----------